



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica



Engenharia Nuclear
UFRJ

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE PENETRAÇÃO DE PALHETA DE TURBINA DESPRENDIDA EM AÇO E CONCRETO EM UMA USINA NUCLEAR

Arthur Pereira de Oliveira

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Nuclear da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e
Melo

Antônio Sérgio De Martin Alves

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Março de 2019

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE PENETRAÇÃO DE
PALHETA DE TURBINA DESPRENDIDA EM AÇO E CONCRETO
EM UMA USINA NUCLEAR

Arthur Pereira de Oliveira

Projeto de Graduação submetido ao Corpo Docente do Departamento de Engenharia Nuclear da Escola Politécnica / UFRJ, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Nuclear.

Examinado por:

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D. Sc.

Dr. Antônio Sérgio De Martin Alves, D. Sc.

Prof. Andressa dos Santos Nicolau, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Março de 2019

Pereira de Oliveira, Arthur.

Análise Comparativa de Modelos de Penetração de Palheta de Turbina Desprendida em Aço e Concreto em uma Usina Nuclear/Arthur Pereira de Oliveira. - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2019.

X, 35 p.: il.; 29,7 cm

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo.
Antônio Sérgio De Martin Alves

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Engenharia Nuclear, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 34-35.

1. Espessura de Penetração. 2. Míssil. 3. BRL. 4.NDRC. 5. Modelo Matemático. I. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo e Antônio Sérgio de Martin Alves. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Nuclear. III. Análise Comparativa de Modelos de Penetração de Palheta de Turbina Desprendida em Aço e Concreto em uma Usina Nuclear.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, por permitir que chegasse até aqui após tantos ensinamentos e todas as pessoas incríveis que estiveram comigo nesta caminhada.

Agradeço ao meu pai Laerte por me ensinar a ir atrás dos meus objetivos, por acreditar no meu potencial para que os alcançasse e por todos os conselhos e ensinamentos.

Minha eterna gratidão à minha mãe, Sueli, por ter lutado tão bravamente durante a vida inteira por mim e meus irmãos, em meio a todas as dificuldades e por ser exemplo de garra, honestidade e generosidade. Jamais conseguirei expressar minha gratidão em gestos e palavras a essa pessoa incrível.

Muito obrigado aos meus irmãos Rodrigo e Fernanda, assim como meu cunhado, Raphael Facundo, por tamanha prontidão em me ajudar, me apoiar e os incontáveis momentos de risadas, tornando tudo mais fácil. Tenho profunda gratidão por vocês. Contem comigo.

Agradeço à minha doce Amanda Macedo, minha namorada, que sempre esteve por perto para me apoiar, me inspirar e não me deixar passar um único dia sem gargalhar com você. Obrigado por me permitir a honra da caminhada. Você é meu orgulho.

Agradeço a todos os grandes professores e funcionários do Programa de Engenharia Nuclear da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por seu compromisso com a formação de engenheiros e cidadãos.

Agradeço ao professor Paulo Fernando Frutuoso não só pela orientação nesse trabalho, mas por todo o tempo que estive na faculdade, genuinamente comprometido em desempenhar cada vez melhor todas as suas atividades como professor, coordenador e orientador, além contribuir com ambiente bastante positivo no convívio diário.

Expresso minha gratidão ao engenheiro Antônio Sérgio por tamanha gentileza, prontidão no auxílio para o desenvolvimento deste trabalho e sugestão de tema.

Por fim, agradeço aos amigos do curso de Engenharia Nuclear pela convivência diária. Conheci pessoas maravilhosas e generosas, que me proporcionaram inúmeros momentos hilários.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Nuclear.

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE PENETRAÇÃO DE PALHETA DE TURBINA DESPRENDIDA EM AÇO E CONCRETO EM UMA USINA NUCLEAR

Arthur Pereira de Oliveira

Março/2019

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Antônio Sérgio De Martin Alves

Curso: Engenharia Nuclear

A Transferência de Rejeitos Radioativos Líquidos é um procedimento, ainda não implementado, iniciado na Usina de Angra 1 em direção a Usina de Angra 2. Em duas das rotas possíveis, o caminhão com os rejeitos passa pelo prédio da Turbina de Angra 2. Um dos possíveis acidentes neste trajeto é o desprendimento de uma das palhetas da turbina, assumindo um comportamento de míssil, com sua consequente colisão com alvos a sua volta. A Eletronuclear S/A, então, realizou um estudo por meio de um modelo, aplicável a alvos de aço e concreto, para determinar se o míssil atravessará todas as barreiras e atingirá o caminhão-tanque. O objetivo deste trabalho é comparar este resultado com os modelos disponíveis na literatura internacional. Para isso, optou-se por utilizar o modelo empírico criado pelo *Ballistic Research Laboratory* para aços e o modelo baseado na teoria da penetração desenvolvido pelo *National Research Defense Committee*, para alvos de concreto. Ambos os modelos selecionados são recomendados pela *U.S National Regulatory Commission*.

Palavras-chave: espessura de penetração, míssil, BRL, NDRC, modelo matemático

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Nuclear Engineer.

COMPARATIVE ANALYSIS OF PENETRATION MODELS OF TURBINE
DETACHED IN STEEL AND CONCRETE IN A NUCLEAR POWER PLANTS

Arthur Pereira de Oliveira

March/2019

Advisors: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Antônio Sérgio de Martin Alves

Major: Nuclear Engineering

The transfer of liquid radioactive waste is a procedure not yet implemented that starts at the Angra 1 plant in the direction of the Angra 2 plant. On two of the possible routes, the truck with the radioactive waste passes through the Angra 2 turbine building. One of the possible accidents along this route is the detachment of one of the vanes, assuming a missile behavior, with its consequent collision with targets around it. Eletronuclear S / A then conducted a study using a model, applicable to steel and concrete targets, to determine if the missile will cross all barriers and hit the truck. The objective of this work is to compare this result with the models available in the international literature. For this, we chose to use the empirical model created by the Ballistic Research Laboratory for steels and the model based on the penetration theory developed by the National Research Defense Committee, for concrete targets. Both selected models are recommended by the U.S. National Regulatory Commission.

Keywords: *penetration thickness, missile, BRL, NDRC, mathematical model*

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Descrição do Local e do Modelo do Acidente	3
2.1. Descrição do Trajeto e Meio de Transporte.....	3
2.2. Características do Míssil	8
2.3. Movimento do Míssil.....	12
3. Apresentação dos Modelos.....	19
3.1. Modelo Atual	19
3.2. Ballistic Research Laboratory	22
3.3. National Defense Research Committee Modificada.....	24
4. Resultados	27
5. Conclusão	32
Referências	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Contêiner-Tanque (4).....	4
Figura 2: Tanque de Transferência de Rejeito Líquido (TTRL) (4).....	5
Figura 3: Vista Lateral da Carreta Mecânica (4).	5
Figura 4: Vista Aérea da Rota 1 (4).....	6
Figura 5: Vista Aérea da Rota 3 (4).....	7
Figura 6: Fotografia de uma Palheta de uma Turbina fabricada pela Siemens (5).	8
Figura 7: Representação de uma Palheta da Turbina de Angra 2 desmembrada (4).....	9
Figura 8: Aproximação da Vista Lateral de uma Palheta Real da Turbina (4).	10
Figura 9: Reprodução da Vista de Topo de uma Palheta da Turbina (4)	10
Figura 10: Vista de Topo Aproximada de uma Palheta (4).....	11
Figura 11: Movimento Circular (6).	13
Figura 12: Representação esquemática da roda dentada com a palheta acoplada a para a turbina de Angra 2 (4).	15
Figura 13: Representação esquemática do movimento, paralelo ao plano do papel, da palheta da turbina de Angra 2 após o rompimento na base (4).	16
Figura 14: Comparação entre as fórmulas de penetração em aço BRL, SRI e NDRC por míssil de 45,36 kg (3)	24
Figura 15: Comparação das espessuras penetradas pelo míssil por velocidade, calculadas pelos modelos utilizados pela Eletronuclear S/A e BRL.	29
Figura 16: Comparação das espessuras penetradas pelo míssil por velocidade, calculadas pelos modelos utilizados pela Eletronuclear S/A e NDRC.....	30
Figura 17: Comparação do comportamento do gráfico quando se diminui a resistência do concreto de 40 Mpa para 30,33 Mpa.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores do parâmetro C para diferentes materiais (4).....	20
Tabela 2: Resumo dos parâmetros necessários para Equação (3.1) (4).....	21
Tabela 3: Valores dos parâmetros auxiliares do modelo matemático (4).....	22
Tabela 4: Dados de entrada nos sistemas Inglês e Internacional.....	27
Tabela 5: Espessuras das barreiras de aço e concreto (4).....	27
Tabela 6: Velocidades de entrada do míssil em cada parede, calculadas por cada modelo.	28
Tabela 7: Espessuras penetradas em cada parede, calculadas por cada modelo.	28

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{a}	Vetor a;
a_x ,	Coordenadas do Vetor \vec{a} nas Direção x
a_y ,	Coordenadas do Vetor \vec{a} nas Direção y
a_z	Coordenadas do Vetor \vec{a} nas Direção z
A	Ponto Localizado na Parte Inferior da Palheta Rompida
A_1	Área de uma Vista de Lado da Palheta da Turbina Desenvolvida em um Plano
A_2	Área de uma Vista de Perfil da Palheta da Turbina Desenvolvida em um Plano
A_3	Área de uma Vista de Topo da Palheta da Turbina Desenvolvida em um Plano
A'_1	Área Mais Realística de uma Vista de Lado da Palheta da Turbina de Angra 2
A'_2	Área Mais Realística de uma Vista de Perfil da Palheta da Turbina de Angra 2
A'_3	Área Mais Realística de uma Vista de Topo da Palheta da Turbina de Angra 2
\vec{b}	Vetor b
b_x	Coordenadas do Vetor \vec{b} na direção x
b_y	Coordenadas do Vetor \vec{b} na direção y
b_z	Coordenadas do Vetor \vec{b} na direção z
B	Ponto Localizado na Parte Superior da Palheta Rompida
BRL	<i>Ballistic Research Laboratory</i>
C	Constante Apresentada na Tabela 1
CM	Contêiner-Marítimo
CNAAA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto;

CT	Contêiner-Tanque
d	Diâmetro Equivalente
e	Espessura de Penetração do Fragmento (Míssil) na Barreira
e_n	Espessura da n-ésima Barreira
F_{AF}	Fator de Correção da Área Frontal do Míssil (Palheta)
F_{AL}	Fator de Correção da Área Lateral do Míssil (Palheta)
f_c	Resistência a Compressão do Concreto
G	Ponto Situado no Centro de Gravidade da Palheta Rompida
GNS	<i>Gesellschaft für Nuklear-Service mbH</i>
\vec{i}	Vetor Unitário na Direção do Eixo – x
\vec{j}	Vetor Unitário na Direção do Eixo – y
K_I	Constante Referente ao Material
K	Fator de Penetrabilidade do Concreto
\vec{k}	Vetor Unitário na Direção do Eixo – z
Log_{10}	Logaritmo Decimal
L_1	Comprimento da Palheta da Turbina Desenvolvida em um Plano
L_2	Largura da Palheta da Turbina Desenvolvida em um Plano
L_3	Espessura da Palheta da Turbina Desenvolvida em um Plano
L'_1	Valor mais Realístico do Comprimento da Palheta da Turbina de Angra 2
L'_2	Valor mais Realístico da Largura da Palheta da Turbina de Angra 2
L'_3	Valor mais Realístico da Espessura da Palheta da Turbina de Angra 2
M	Massa do Fragmento (Míssil)
n	Número de Rotações por Minuto do Eixo da Turbina de Angra 2
N	<i>Nose Shape Factor</i>

NDRC	<i>National Defense Research Committee</i>
O	Ponto Localizado na Linha de Centro do Eixo da Turbina de Angra 2
P	Ponto Qualquer sobre a Circunferência
r_A	Distância do Ponto A em Relação à Linha de Centro do Eixo da Turbina
r_B	Distância do Ponto B em Relação à Linha de Centro do Eixo da Turbina
r_G	Distância do ponto G em relação à linha de centro do eixo da turbina
s	Comprimento do Arco de uma Circunferência
SRI	<i>Stanford Research Institute</i>
TTRL	Tanque de Transferência de Rejeito Líquido Radioativo
SAC	Sistema de Ar Comprimido
SAE	Sistema de Alimentação Elétrica
SEE	Sistema de Enchimento e Esvaziamento
SIC	Sistema de Instrumentação e Controle
SV	Sistema de Ventagem
UKA	Edifício Auxiliar do Reator
v	Velocidade da Palheta (Míssil)
v_A	Velocidade Tangencial do Ponto A
v_B	Velocidade Tangencial do Ponto B
v_G	Velocidade Tangencial do Ponto G
$(v_L)_n$	Velocidade Limite para a n-ésima Barreira
v_n	Velocidade com que o Fragmento Atinge a n-ésima Barreira
VT	Veículo de Transferência
\vec{v}	Vetor Velocidade do Fragmento (Míssil)
X	Eixo Coordenado na Direção Horizontal

y	Eixo Coordenado na Direção Azimutal
z	Eixo Coordenado na Direção Vertical
θ	Ângulo Formado entre Dois Vetores
ω	Velocidade Angular do Eixo da Turbina de Angra 2
ω_{AG}	Velocidade Angular do Ponto A em Relação ao Ponto G
ω_{BG}	Velocidade Angular do Ponto B em Relação ao Ponto G
$\vec{\omega}$	Vetor Velocidade Angular do Eixo da Turbina de Angra 2

1. Introdução

A energia elétrica encontra sua importância em quase todos os aspectos da vida no planeta Terra. Ela pode ser usada tanto na preparação quanto na preservação de alimentos, gerar luz, por em funcionamento dispositivos eletrônicos e meios de transporte. Para que todas estas atividades humanas aconteçam, há de se pensar na viabilidade de sua produção em um contexto onde a demanda por energia aumenta com o passar dos anos. Uma das fontes de energia com a melhor relação-custo benefício atualmente é a energia nuclear.

Os reatores nucleares produzem energia iniciando e controlando uma reação nuclear em cadeia. As reações nucleares, por si só, liberam uma grande quantidade de energia a cada colisão, mas o fato de elas acontecerem em cadeia permite que a produção de energia se prolongue. Atualmente, mais de 400 reatores estão em operação, em cerca de 30 países, perfazendo cerca de 11% da produção de energia mundial [1]. No Brasil, a Eletronuclear S/A opera a produção de energia elétrica em duas usinas nucleares.

Localizadas na praia de Itaorna, no município de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro, elas compõem a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA). Com início da construção na década de 70, as duas usinas são responsáveis pela geração de, aproximadamente, um terço da energia elétrica no estado do Rio de Janeiro e 3% da energia do país, gerando 640 MWe e 1350 MWe, respectivamente, as usinas de Angra 1 (operando desde 1985) e Angra 2 (operando desde 2001) [2]. Existe ainda a terceira unidade de geração de energia, Angra 3, ainda em construção e sendo uma das maiores prioridades para a Eletronuclear S/A.

A atividade do setor nuclear, embora poderosa, gera resíduos e rejeitos, necessitando de profundo estudo a fim de se avaliar os possíveis impactos ambientais. Dito isto, uma das questões mais essenciais ao se tratar de operação de usina nuclear é o gerenciamento dos resíduos e rejeitos produzidos.

No projeto de usinas nucleares, pode ser apropriado considerar os efeitos de vários eventos perigosos na segurança de equipamentos e estruturas. A geração de mísseis após alguma ocorrência acidental representa um dos possíveis eventos que podem precisar ser considerados. Neste contexto, um míssil pode ser definido como um projétil capaz de causar danos ao equipamento ou estruturas nas quais incide. O míssil pode ser transportado com energia rotacional e translacional [3]. Embora os mísseis possam ser gerados de diferentes formas, este trabalho concentra-se apenas naqueles mísseis gerados após a ruptura em um equipamento que opera com movimento rotacionais, como uma

turbina. A fim de permitir uma avaliação completa do problema dos mísseis, é necessário definir primeiro as características do míssil e seu movimento e, em segundo lugar, a sua interação com o componente sobre o qual impacta.

Este trabalho se propõe a determinar, por modelos alternativos ao já utilizado pela Eletronuclear S/A, a possibilidade de a palheta da Turbina de Baixa Pressão da Usina de Angra 2, em um cenário onde ocorra uma falha e ela se desprenda, atinja o Contêiner-Tanque durante Transferência de Rejeitos Líquidos Radioativos da Usina Nuclear Angra 1 para a Usina Nuclear Angra 2, onde serão processados e acondicionados. Esta possibilidade é condicionada ao sucesso da palheta em atravessar as diferentes barreiras possíveis em seu caminho até o Contêiner-Tanque. Por fim, os resultados destes modelos serão analisados e comparados com o modelo vigente, que consiste de uma única fórmula para diferentes materiais, onde é necessário apenas substituir a constante referente ao material da barreira em questão.

São levados em consideração aspectos referentes à palheta, como sua massa, velocidade após desprendimento do rotor da turbina e forma (incluindo área de ataque que consiste na área que, de fato, entrará em contato de forma preliminar com as barreiras), ao passo que serão consideradas características das barreiras, como espessura e materiais. Devido à constituição de diferentes materiais, este trabalho sugere que as barreiras de aço e de concreto sejam tratadas por modelos diferentes.

No caminho para a solução do problema proposto, é necessária a descrição do Contêiner-Tanque, do local, das características físicas da palheta e dos requisitos físicos e matemáticos para entendimento do deslocamento da palheta. Estes aspectos serão apresentados no Capítulo 2.

No Capítulo 3, serão apresentados tanto o modelo vigente de penetração de míssil quanto os propostos para penetração em aço e concreto.

No Capítulo 4, os resultados serão discutidos.

Por fim, o Capítulo 5 será destinado às conclusões.

2. Descrição do Local e do Modelo do Acidente

O presente capítulo visa descrever:

- os eventos relacionados à Transferência de Rejeitos Radioativos Líquidos, na Seção 2.1;
- descrição física da palheta e dos conceitos físicos e matemáticos que explicam seu movimento, expostos na Seção 2.2.

2.1. Descrição do Trajeto e Meio de Locomoção

A Transferência de Rejeitos Líquidos Radioativos, saindo da Usina de Angra 1 em direção a Angra 2, possibilita que os rejeitos líquidos radioativos de Angra 1 sejam processados e acondicionados em Angra 2. Este movimento encontra justificativa no fato de que o processo de acondicionamento de rejeitos radioativos líquidos utilizado em Angra 2 permite que sejam produzidos menos embalados do que em Angra 1. Portanto, a transferência visa buscar a redução da quantidade de embalados gerados durante a vida útil da Usina Nuclear Angra 1 [4].

Em resumo, o transparência começa quando os rejeitos radioativos são colocados dentro do Contêiner-Tanque na Área de Transferência de Rejeito Radioativo Líquido, na Usina de Angra 1, transportados pelas rotas 1 (Figura 4), 2 ou 3 (Figura 5), rumo a Área de Transferência de Rejeitos 2, no Edifício Auxiliar do Reator (UKA) de Angra 2. O objeto alvo deste estudo, a análise do evento de desprendimento da palheta da turbina, ocorre justamente quando o Contêiner-Tanque passa pelo Prédio da Turbina de Angra 2 nas rotas 1 e 3.

Este acidente é caracterizado quando parte ou totalidade da palheta da turbina da Usina de Angra 2 se desprende, atravessa diversas barreiras e atinge o Contêiner-Tanque, provocando a sua capotagem e vazamento dos rejeitos líquidos, resultando em contaminação da rede asfáltica e rede de drenagem, afetando as pessoas que trabalham na transferência. Visto que tanto o desprendimento da palheta, quanto o seu encontro com o Contêiner-Tanque são considerados improváveis, este episódio é igualmente declarado como de frequência improvável. No entanto, mesmo sua ocorrência sendo considerada quase inexistente, suas consequências causam grande impacto, fazendo com que sua severidade seja considerada crítica. Por fim, criando-se uma composição das categorias

de frequência e severidade, pode-se considerar este evento como insignificante, embora, para efeitos de licenciamento, deve ser estudado [4].

O compartimento utilizado para Transferência de Rejeitos Radioativos Líquidos pela Eletronuclear S/A é o mesmo utilizado pela empresa alemã *Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (GNS)*, conhecido como Contêiner-Tanque (CT). Basicamente, ele é constituído pelos componentes: Contêiner Marítimo (CM), Tanque de Transferência de Rejeito Líquido (TTRL) e dos Sistema de Alimentação Elétrica (SAE), de Ar Comprimido (SAC), de Enchimento e Esvaziamento (SEE), de Ventagem (SV) e de Instrumentação e Controle (SIC).



Figura 1: Contêiner-Tanque [4].

O Contêiner-Marítimo é composto de aço carbono e, em geral, suas dimensões são: 6059 mm de comprimento, 2500 mm de largura e 2438 mm, vide Figura 1. Ele corresponde a uma das barreiras consideradas neste estudo. Dentro dele, encontra-se o Tanque de Transferência de Rejeito Líquido (TTRL), onde são armazenados os rejeitos radioativos. O TTRL utilizado no interior do contêiner-marítimo é similar ao tanque mostrado pela Figura 2.

O tanque possui múltiplas paredes de aço, sendo o conjunto formado por 3 (três) tanques; um tanque interno, um tanque intermediário e um tanque externo, agrupados em forma de cascas. O vão entre o tanque interno e o tanque intermediário é monitorado por um Indicador de Vazamento a Vácuo, que propicia uma maior segurança no transporte de rejeitos radioativos líquidos. Já o espaço entre o tanque do meio e o externo é preenchido com isolamento térmico [4].



Figura 2: Tanque de Transferência de Rejeito Líquido (TTRL) [4].

O deslocamento é realizado pelo Veículo de Transferência (VT) que, em princípio, possui certa flexibilidade em sua escolha, desde que este seja capaz de realizar tal tarefa. É composto, basicamente, por uma carreta puxada por um trator rebocador, conforme mostrado na Figura 3.



Figura 3: Vista Lateral da Carreta Mecânica [4].

Definidos os compartimentos e veículo utilizados na transferência dos rejeitos radioativos, torna-se necessário abordar as rotas prováveis a serem utilizadas. Como as Rotas de Transferência 1 e 3 estão localizadas ao lado do prédio da Turbina da Usina de Angra 2, elas serão abordadas a seguir.

A Rota de Transferência 1 representa um deslocamento de, aproximadamente, 550 m, percorrendo as ruas 16, 21, 26 e 22, conforme mostrado na Figura 4. Já a Rota de Transferência 3, perfaz 450 m em um caminho que passa pelas ruas 16, 21, 29 e 22, conforme ilustrado na Figura 5. Ambos os caminhos possuem em comum o fato de que a mudança de ruas que o Veículo de Transferência e o Tanque de Transferência de Rejeito Líquido deverão realizar é caracterizada por mudanças de direção de 90°, além da presença de edifícios.



Figura 4: Vista Aérea da Rota 1 [4].



Figura 5: Vista Aérea da Rota 3 (4).

2.2. Características do Míssil

A literatura apresenta inúmeros modelos que visam prever a capacidade de um objeto, que se comporta como míssil, atravessar uma barreira constituída de um determinado material. Porém, antes de tratar de qualquer modelo, faz-se necessária a descrição da palheta da turbina. Cabe destacar que, embora um conjunto de situações possam fazer com que fragmentos sejam lançados devido a operação da turbina, será considerado somente a situação onde a palheta se desprende do rotor da turbina.

Diferentemente de Angra 1, cuja fabricação é de origem norte-americana, a usina de Angra 2 foi construída pela empresa alemã Siemens. A Figura 6 ilustra o modelo da turbina que será alvo deste estudo.

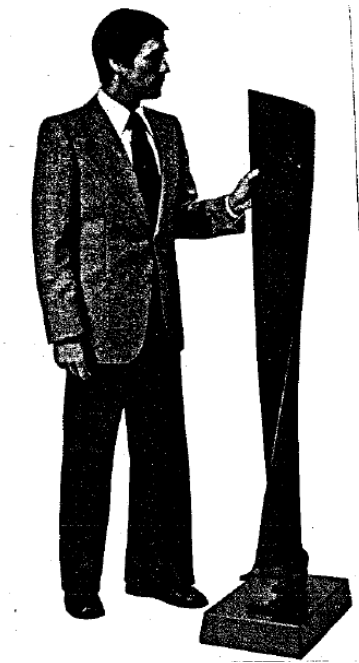


Figura 6: Fotografia de uma Palheta de uma Turbina fabricada pela Siemens [5].

A penetração da palheta em um alvo é diretamente influenciada pelo comportamento de sua área de ataque (área de impacto) no momento da colisão, sendo definida como a área que, de fato, tem contato com a barreira. Neste percurso, o corpo pode sofrer deformações plásticas e elásticas, dependendo do material constituinte tanto do míssil quanto da barreira, o ângulo de incidência do objeto, massa, velocidade, dentre outros fatores importantes. Modelar este problema traz certo grau de complexidade. Por isso, foi considerado que o míssil é um corpo rígido.

Um corpo rígido é um conceito limite ideal de um corpo indeformável quaisquer que sejam as forças a ele aplicadas: um corpo é rígido quando a distância entre duas partículas quaisquer do corpo é invariável. Nenhum corpo é perfeitamente rígido: uma barra de aço se deforma sob a ação de forças suficientemente intensas e duas bolas de bilhar que colidem deformam-se ao entrar em contato. Entretanto, as deformações são, em geral, suficientemente pequenas para que possam ser desprezadas em primeira aproximação [6].

Na Figura 7 é mostrado um prisma que representa, de forma simplificada, a geometria planificada da palheta da turbina.

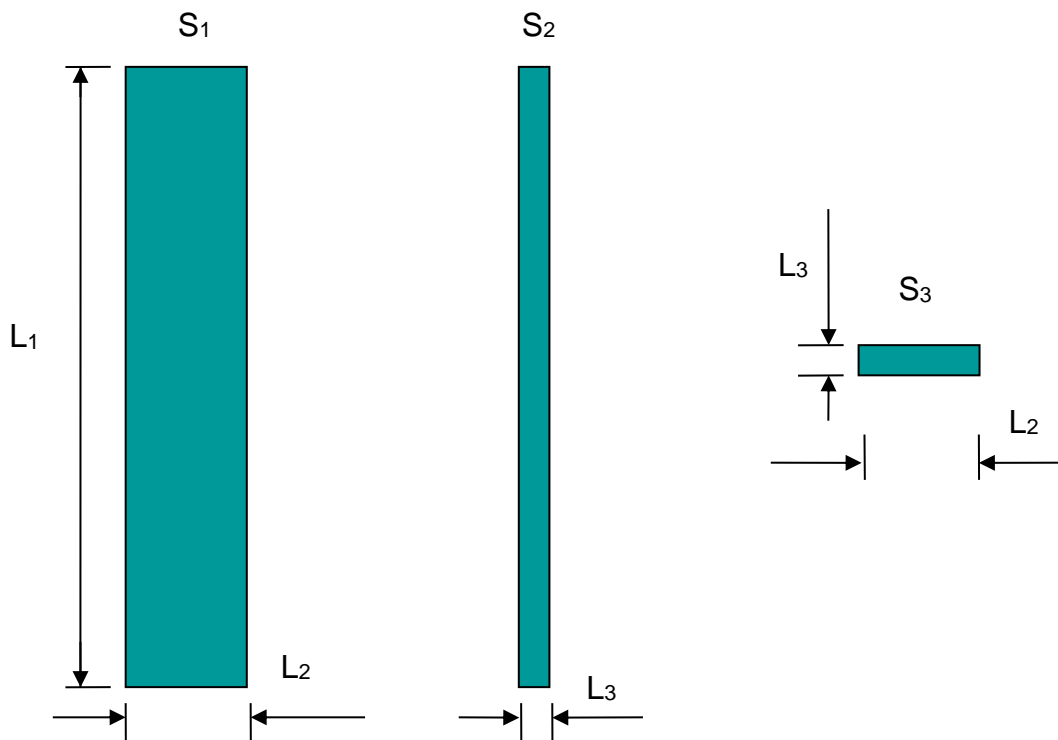


Figura 7: Representação de uma Palheta da Turbina de Angra 2 desmembrada [4].

Basicamente, dado o formato do objeto, foram definidas 3 (três) áreas diferentes, onde:

S_1 = área da vista frontal da palheta, expressa em $[m^2]$;

S_2 = área da vista de perfil da palheta, expressa em $[m^2]$;

S_3 = área da vista de topo da palheta, expressa em $[m^2]$;

L_1 = comprimento da palheta, expressa em $[m]$;

L_2 = largura da palheta, expressa em $[m]$;

L_3 = espessura da palheta, expressa em $[m]$;

No entanto, apesar de a imagem anterior ilustrar a palheta de forma linear, é possível se aproximar da geometria real da palheta efetuando rotação de 90° em torno de seu eixo axial, de maneira a obter as geometrias apresentadas nas Figuras 8 e 9. Ao oferecer este tratamento mais real ao míssil, as áreas S_1 , S_2 e S_3 se transformam nas áreas S'_1 , S'_2 e S'_3 . Os comprimentos L_1 , L_2 e L_3 são substituídos pelo pelos comprimentos L'_1 , L'_2 e L'_3 além da adição de mais um parâmetro, L'_4 , conforme Figura 8.

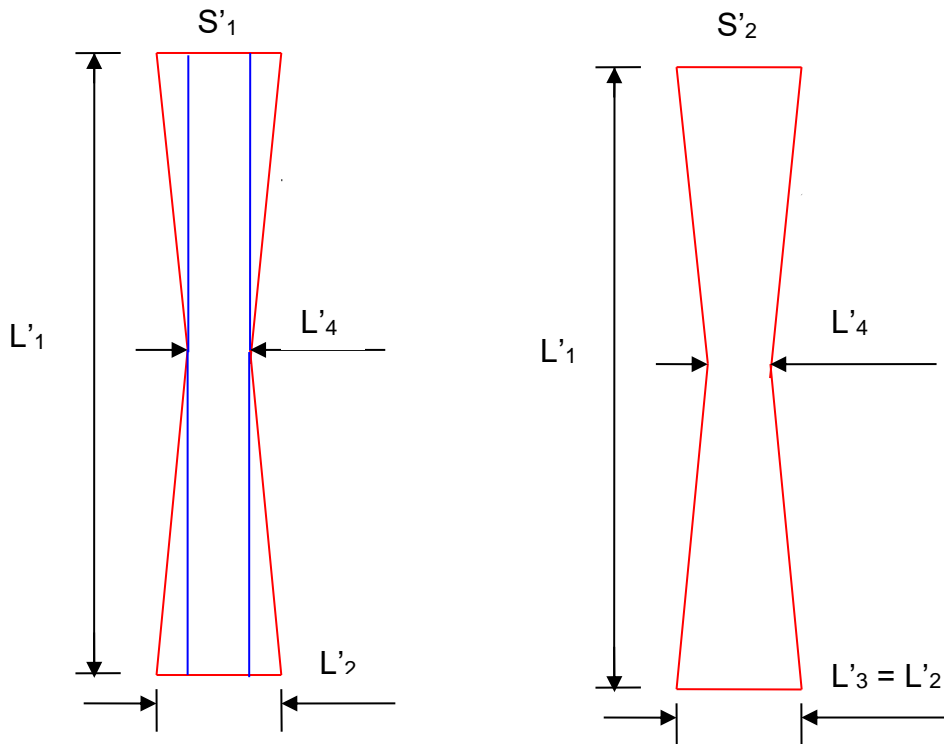


Figura 8: Aproximação da Vista Lateral de uma Palheta Real da Turbina [4].

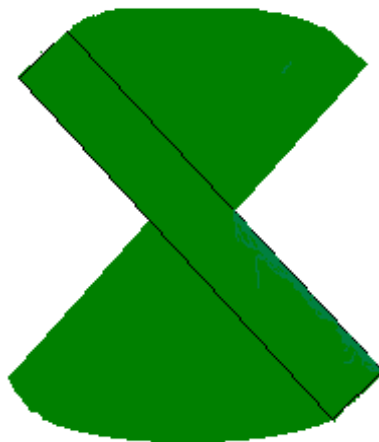


Figura 9: Reprodução da Vista de Topo de uma Palheta da Turbina [4].

A vista de topo pode ser substituída por um modelo simplificado para viabilizar o cálculo de sua área, conforme mostrado na Figura 10.

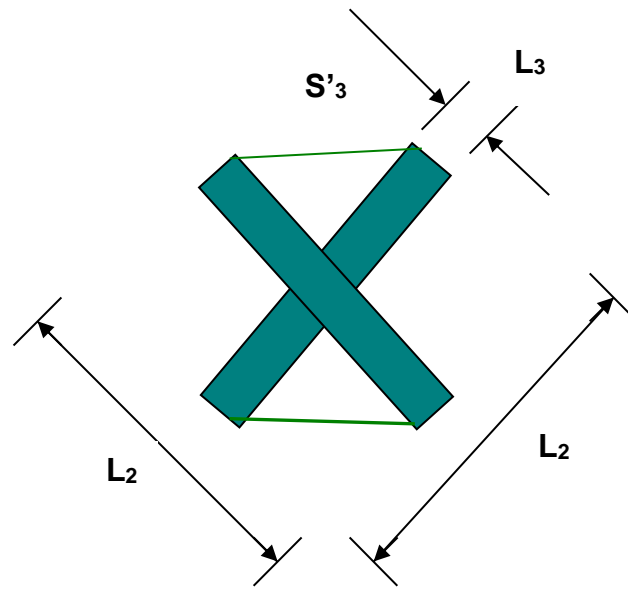


Figura 10: Vista de Topo Aproximada de uma Palheta [4].

Existem diversas posições possíveis com que a palheta pode colidir com os alvos. Como primeira opção, ela pode colidir frontalmente formando um ângulo diferente de 90° com as paredes, culminando em um choque secundário da área lateral com o alvo. Outra possibilidade seria o contato integral da área lateral com o alvo, ou seja, com o eixo da palheta paralelo ao da parede. Por fim, a colisão frontal, com o eixo formando 90° com a parede. Esta última opção possui maior potencial de penetração pois a área de contato é a menor possível, conferindo maior pressão ao alvo. Por isso, somente este caso será considerado, onde a área de ataque correspondente à vista superior, representada por S'_3 .

A área de ataque frontal é calculada somando as áreas de 2 dois retângulos cuja largura é representada por L_3 e comprimento L_2 com as de 2 (dois) triângulos retângulos com base e altura iguais a $\frac{(L_2-L_3)}{2}$ e posterior subtração de um quadrado de lado L_3 , área da interseção entre os 2 retângulos.

$$S'_3 = 2 \cdot (L_2 \cdot L_3) + 2 \cdot \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{L_2 - L_3}{2}\right) \cdot \left(\frac{L_2 - L_3}{2}\right) - (L_3 \cdot L_3) \quad (2.1)$$

$$S'_3 = 2(L_2 L_2) + \left(\frac{L_2 - L_3}{2}\right)^2 - L_3^2 \quad (2.2)$$

A área de ataque, levando em consideração a interação que o míssil tem com a barreira por meio do fator de correção, resulta na seguinte equação

$$S'_3 = F_{AF} [2(L_2 L_2) + \left(\frac{L_2 - L_3}{2}\right)^2 - L_3^2] \quad (2.3)$$

2.3. Movimento do Míssil

O cenário base deste estudo consiste do desprendimento da palheta da Turbina da usina Angra 2 em sua totalidade, não sendo consideradas hipóteses de partes menores do objeto.

A turbina em funcionamento desenvolve o movimento circular onde, por simplificação, é considerado uniforme. O movimento é dito circular quando sua trajetória descreve um círculo [6] e o fato de ser uniforme é devido ao caráter imutável da velocidade.

Considerando r como a distância da partícula ao centro de rotação e P a posição instantânea da partícula definida como o ângulo θ entre o raio $r=OP$ correspondente e o eixo OX , vide Figura 11. O arco s correspondente ao ângulo θ é dado por [6]

$$s = r\theta \quad (2.4)$$

sendo θ medido em radianos.

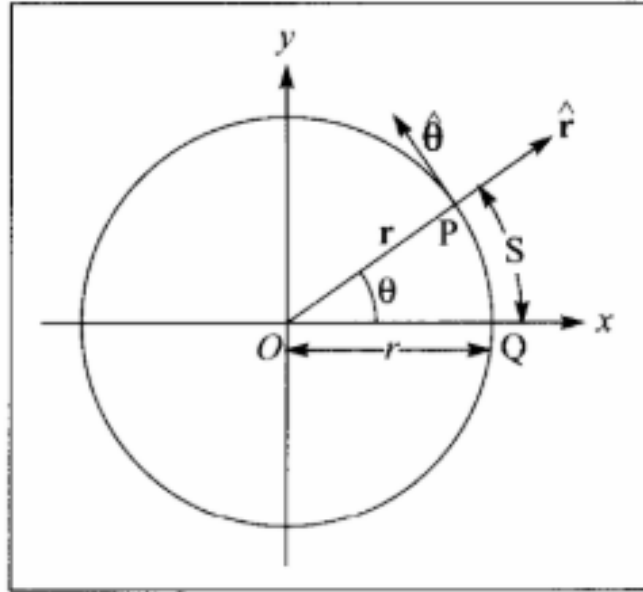


Figura 11: Representação do Movimento Circular [6].

O vetor velocidade instantânea de um ponto P do corpo rígido em rotação, que tem um deslocamento infinitesimal δs durante o intervalo de tempo infinitesimal δt é dado por (6):

$$\vec{v} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\delta \vec{s}}{\delta t} \right) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\delta \theta}{\delta t} \right) \times \vec{r} \quad (2.5)$$

Como $\delta s = \delta r$,

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (2.6)$$

Onde

$$\vec{\omega} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\delta \theta}{\delta t} \right) = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.7)$$

onde \times representa o produto vetorial.

Em diversas aplicações, da álgebra vetorial a problemas de geometria e mecânica, é necessário utilizar um artifício para a determinação do vetor perpendicular,

simultaneamente a \vec{a} e \vec{b} [7]. Este vetor é calculado pelo produto vetorial, conforme mostrado Equação (2.8):

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_x & u_y & u_z \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix} \quad (2.8)$$

onde:

$$\vec{a} = u_x \vec{i} + u_y \vec{j} + u_z \vec{k} \quad (2.9)$$

$$\vec{b} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k} \quad (2.10)$$

u_x, u_y, u_z = coordenadas do vetor \vec{a} nas direções dos eixos coordenados x, y e z;

v_x, v_y, v_z = coordenadas do vetor \vec{b} nas direções dos eixos coordenados x, y e z;

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ = vetores unitários nas direções dos eixos coordenados x, y e z.

Tem-se:

$$\vec{r} = r \cdot \vec{k} \quad (2.11)$$

$$\vec{\omega} = \omega \cdot \vec{j} \quad (2.12)$$

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (2.13)$$

Aplicando as Equações (2.8), (2.11) e (2.12) em (2.13):

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r} = \det \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & \omega & 0 \\ 0 & 0 & r \end{vmatrix} = \omega \cdot r \cdot \vec{i} \quad (2.14)$$

Para entender a dinâmica do funcionamento da turbina, faz-se necessário mostrar a Figura 12, cuja circunferência preenchida com a cor vermelha é o equivalente ao eixo e o retângulo verde, uma representação simplificada da palheta.

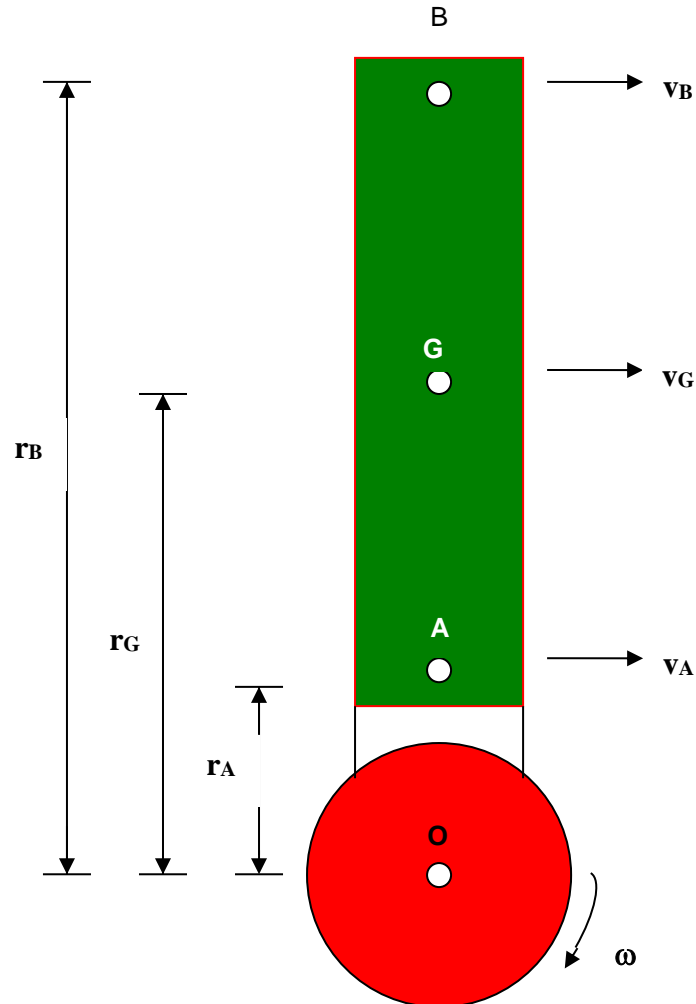


Figura 12: Representação esquemática da roda dentada com a palheta acoplada para a turbina de Angra [4].

Na Figura 12, fica evidente o fato de que os pontos A e B representam, respectivamente, a extremidade em contato com o eixo da Turbina de Baixa Pressão e a extremidade livre. Ainda, o ponto G representa o centro de gravidade da lâmina, enquanto que r_A , r_B e r_G , indicados nas cotas acima, representam as distâncias em relação ao ponto O. Por fim, as velocidades tangenciais em cada um dos 3 (três) pontos são calculadas, conforme definição acima e na Equação (2.14), onde são encontradas pelas equações:

$$v_A = \omega \cdot r_A \quad (2.15)$$

$$v_G = \omega \cdot r_G \quad (2.16)$$

$$v_B = \omega \cdot r_B \quad (2.17)$$

O objetivo deste estudo é justamente entender a relação da palheta, pós rompimento, com as diferentes barreiras que ela porventura encontre no caminho. Foi apresentada a lógica por trás do movimento da turbina, enquanto a palheta está presa ao seu eixo. Neste momento, será explicado o movimento após a palheta se desprender. Como definido anteriormente, o cenário base é de rompimento da palheta em sua base, vide Figura 13.

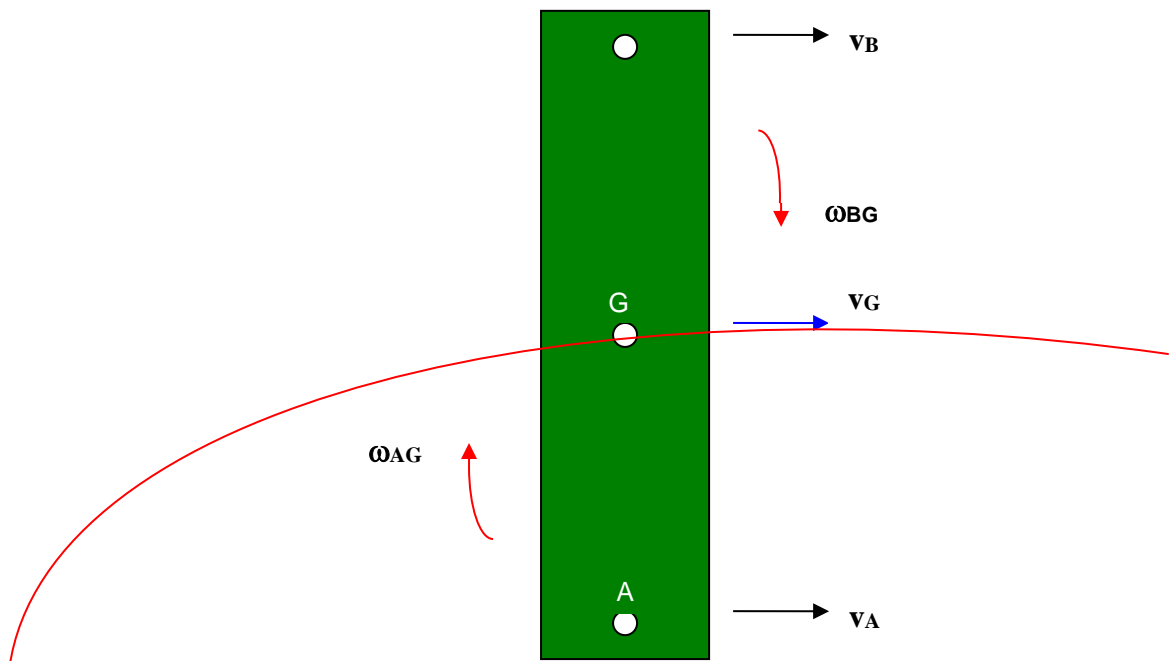


Figura 13: Representação esquemática do movimento, paralelo ao plano do papel, da palheta da turbina de Angra 2 após o rompimento na base [4].

Assumindo a barra uniforme e, como consequência, o ponto G sendo o ponto médio da palheta e centro de gravidade, a velocidade do ponto A (local do desprendimento da palheta), pode ser obtido por meio da expressão [8]:

$$v_A = v_G + \omega_{AG}(r_A - r_G) \quad (2.18)$$

Da mesma forma, a velocidade do ponto B é encontrada pela equação

$$v_B = v_G + \omega_{BG}(r_B - r_G) \quad (2.19)$$

Nota-se que a velocidade tangencial do ponto A é igual ao somatório da velocidade tangencial do centro de gravidade e do produto da velocidade angular da palheta com a distância entre A e G. De maneira similar, ocorre o mesmo com a velocidade tangencial do ponto B.

A substituição das Equações (2.15) e (2.17) em (2.18) e (2.19) culmina em:

$$\omega \cdot r_A = \omega r_G + \omega_{AG}(r_A - r_G) \quad (2.20)$$

$$\omega \cdot r_B = \omega r_G + \omega_{BG}(r_B - r_G) \quad (2.21)$$

Simplificando,

$$\omega_{AG} = \omega \quad (2.22)$$

$$\omega_{BC} = \omega \quad (2.23)$$

O raio do centro de massa, descrito como r_G , é calculado como a distância média entre as extremidades A e B. Portanto:

$$r_G = \left(\frac{r_A + r_B}{2}\right) \quad (2.24)$$

Com relação à velocidade angular do sistema, pode-se definir conforme demonstrado abaixo:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad (2.25)$$

Onde n = número de rotações por minuto do eixo da turbina de Angra 2, [rpm];

Nos modelos utilizados para definir a penetração do projétil nas barreiras de aço e concreto, a velocidade tangencial do projétil deverá ser igual a:

$$v = v_G = \omega r_G \quad (2.26)$$

Finalmente, após definirmos todas as variáveis necessárias para os cálculos presentes no modelo, podemos reorganizar as Equações. (2.25) e (2.26), resultando na seguinte expressão:

$$v = \frac{2.\pi.n.r_G}{60} \quad (2.27)$$

3. Apresentação dos Modelos

Após a definição das características do míssil, bem como dos modelos físicos e matemáticos que tratam do movimento do míssil, faz-se necessário abordar tanto o modelo da Eletronuclear S/A [9] quanto os modelos BRL [10] e NDRC [11]. Cabe ressaltar que este trabalho se baseou em um estudo único para barreiras de aço e concreto, ao passo que serão propostos dois modelos, um para aço comum e outro para concreto comum. Por fim, vale lembrar que este capítulo fará apenas a exposição de tais modelos, sendo a comparação entre eles apresentada no Capítulo 4.

3.1. Modelo Atual

O modelo exposto no decorrer desta seção é utilizado pela Eletronuclear atualmente e, basicamente, existe a possibilidade de utilização de duas fórmulas: uma quando míssil possuir massa inferior 1 kg, sendo definido como “pequeno fragmento” e quando possuir massa superior a 1kg, definido como “grande fragmento” [4]. A partir desta definição, a fórmula é aplicável tanto para o concreto quanto para o aço, cabendo a necessidade apenas de mudança da constante correspondente a cada material.

Visto que a palheta da turbina possui massa de 80 kg, será apresentada somente a fórmula para grandes fragmentos. A espessura “e” de penetração em barreiras de concreto ou aço é definida pela equação:

$$e = \frac{C.m}{A} \cdot \log_{10}(1 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot v^2) \quad (3.1)$$

onde:

e = espessura de penetração do fragmento na barreira, [m];

A = área projetada do fragmento na barreira (área de impacto), [m²];

C = constante apresentada na Tabela 1, [m³/kg];

log₁₀ = logaritmo decimal;

m = massa do fragmento (míssil), [kg];

v = velocidade do fragmento, [m/s].

Tabela 1: Valores do parâmetro C para diferentes materiais [4].

Material	C [m³/kg]
Concreto comum	$3,5 \cdot 10^{-4}$
Aço comercial	$5,0 \cdot 10^{-5}$
Aço inoxidável	$3,0 \cdot 10^{-5}$

Ao aplicar-se a velocidade calculada na Eq. (2.27), obtém-se a espessura “e” e, caso este resultado seja menor do que a espessura da barreira, significa que o míssil não conseguiu atravessá-la. Caso contrário, será necessário calcular a velocidade de saída do míssil.

Denominando-se de velocidade limite, $(v_L)_{n-1}$, a velocidade necessária para que o fragmento atravessasse uma espessura e_{n-1} , observa-se que a velocidade v_n com que o fragmento atingirá a n-ésima barreira pode ser determinada pela seguinte equação:

$$v_n = v_{n-1} - (v_L)_{n-1} \quad (3.2)$$

$$(v_L)_{n-1} = \left(\frac{10 \left(\frac{e_{n-1} \cdot A}{C \cdot m} \right) - 1}{5 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,5} \quad (3.3)$$

onde:

v_{n-1} = velocidade com que o fragmento atingiu a barreira n-1 (barreira anterior), [m/s].

Os parâmetros utilizados na Equação (3.1) são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 2: Resumo dos parâmetros necessários para a Equação (3.1) [4].

Tamanho Fragmento	Nº Equação	Fórmula	Parâmetros Equação
Grande	(3.1)	$e = \frac{C \cdot m}{A} \cdot \log_{10}(1 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot v^2)$	A, C, m, v

De acordo com a Tabela 2, a utilização da Equação. (3.2) requer o conhecimento dos valores dos seguintes parâmetros:

A = área projetada do míssil na barreira (área de impacto), [m²];

C = parâmetro dependente do material da barreira, [m³/kg];

m = massa do míssil, [kg];

v = velocidade do míssil, [m/s].

Ao interagir com a barreira, o míssil sofre influência de vários fenômenos, dificultando a determinação da área projetada da palheta na barreira com que ela interage. Dentre os fatores que a influenciam, estão [9]:

- Cada material possui um nível de dureza sobre determinadas condições do ambiente. Com isso, caso a dureza do míssil seja maior do que a do material que constitui as barreiras, acarretará no aumento da área de contato;
- O fenômeno da flambagem contribui para o aumento da área de contato;
- Existe a possibilidade de deformação plástica durante as interações;
- Planificação do míssil na interação com as barreiras, causando redução da área de impacto.

Dito isso, dois fatores de correção são atribuídos ao modelo para que as hipóteses acima sejam levadas em consideração. Cabe ressaltar que este modelo leva em consideração duas formas de interação míssil-barreira: a primeira a área projetada é equivalente a vista superior e a segunda, a vista lateral. Por isso, existem dois fatores, que são:

F_{AL} = fator de correção da área lateral do míssil (palheta);

F_{AF} = fator de correção da área frontal do míssil (palheta).

No entanto, como a área superior possui a menor área e, portanto, exercendo maior pressão sobre os alvos, considerou-se, para este estudo, somente este tipo de colisão. Por estar analisando um caso de acidente e, com isso, devendo buscar o entendimento dos piores cenários possíveis a fim de que as medidas cabíveis sejam tomadas para que eles não venham a ocorrer, optou-se por uma postura conservadora na análise dos resultados, proporcionada pela colisão da vista superior.

Por fim, a Tabela 3 apresenta os dados do problema utilizado neste modelo.

Tabela 3: Valores dos parâmetros auxiliares do modelo matemático [4].

Parâmetro	Unidade	Valor
F_{AF}	-----	0,35
F_{AL}	-----	0,35
L_1	[m]	1,2140
L_2	[m]	0,4220
L_3	[m]	0,0200
m	[kg]	80
n	[rpm]	1800
r_A	[m]	1,1050
r_B	[m]	2,3190

3.2. Ballistic Research Laboratory

A disponibilidade de estudos na literatura para buscar o melhor entendimento do comportamento do aço ao ser atingido por míssil possui notória escassez. Isto ocorre pois diversas foram as motivações e limitações do que era considerado como míssil, como o caso de Kar AK [12], cujo fato gerador do míssil são tornados. Além disso, a maioria dos estudos possuem domínio de validade para algumas variáveis do sistema extremamente restrito, seja por que o domínio além destes limites já está definido como inválido por meio de testes práticos ou simplesmente pois ainda não existem estudos realizados que atestem tais limites [13]. No entanto, cabe ressaltar que, de acordo com Q.M.Li, X.W.Chen [13], as fórmulas empíricas se mostram as mais confiáveis e diretas.

A primeira barreira encontrada pelo míssil é a carcaça da turbina, feita de aço comercial, com 58 mm de espessura. A fórmula empírica proposta para este material é do modelo desenvolvido por pesquisadores do *Ballistic Research Laboratory*, apresentada a seguir:

$$x^{3/2} = \frac{0,5mv^2}{17.400K_1^2d^{3/2}} \quad (3.4)$$

onde x é a espessura, m é a massa do míssil, v a sua velocidade, K_1 é constante referente ao material e igual a 1, d é o diâmetro equivalente. Todas as unidades neste modelo estão expressas no Sistema Inglês, sendo a conversão para o Sistema Internacional necessária para a análise dos resultados posteriores. Além disso, devido à irregularidade da forma do míssil, optou-se por adotar o diâmetro equivalente. Basicamente, tomou-se a área encontrada no modelo da Eletronuclear S/A e calculou-se o diâmetro equivalente a um círculo cuja área é igual àquela (14).

O primeiro motivo para que esse modelo fosse escolhido é a indicação dada pela *U.S Nuclear Regulatory Commission* [15]. O segundo ponto foi o contexto de desenvolvimento deste estudo, onde foram realizados testes com munições e projéteis a alta velocidade, de acordo com J. Tulacz e R.E. Smith [3].

Apesar destes fatores, a fórmula BRL não possui limites claros de espessura da barreira de aço, diâmetro, massa e velocidade do míssil. No entanto, em conjunto com as deliberações acima, este modelo foi escolhido devido ao estudo de J Tulacz e R.E.Smith que realizou testes experimentais comparando este modelo com o desenvolvido pelo *Stanford Research Institute*, modelo amplamente aceito pela comunidade internacional e também recomendado pela *U.S Nuclear Regulatory Commission*. Pela Figura 14, nota-se que, dado o diâmetro equivalente calculado neste trabalho e a velocidade de impacto o modelo BRL apresentou possível adequabilidade.

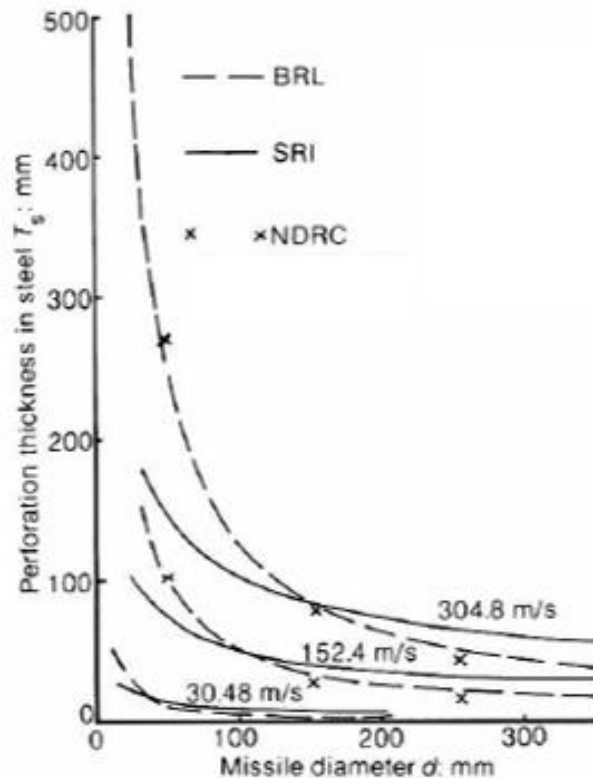


Figura 14: Comparação entre as fórmulas de penetração em aço BRL, SRI e NDRC por míssil de 45,36 kg [3].

3.3. *National Defense Research Committee* Modificada

Depois de analisar a reação da primeira barreira que o míssil encontrará, é necessário entender como se comportarão as demais. A segunda barreira a ser encontrada é feita de concreto, com 250 mm de espessura e 40 MPa de resistência. De acordo com R.P.Kennedy [16], a velocidade de interesse para a análise de movimento de mísseis na indústria nuclear está entre 100 ft/s (30,48 m/s) e 600 ft/s (182,88 m/s), limites esses que correspondem ao calculado neste trabalho.

De fato, os modelos que estimam a distância percorrida pelo míssil em uma parede de concreto são encontradas em maior quantidade na literatura, como os modelos propostos por *Ballistic Research Laboratory* (BRL) para concreto e pelo *National Defense Research Committee* (NDRC). Este modelos são recomendados pela *National Regulatory Commission* [15]. Além disso, a principal vantagem do segundo sobre os demais existentes é o fato de, por ter se baseado na teoria de penetração, mesmo que existam limites para as variáveis do problema baseado nos testes experimentais realizados até hoje, ele pode ser extrapolado para além destes limites.

Em 1941, pesquisadores do *Ballistic Research Laboratory* (17) desenvolveram sua fórmula (no Sistema Inglês) para calcular a profundidade de penetração no concreto, atingido por um míssil rígido:

$$\frac{x}{d} = \frac{427}{\sqrt{f_c}} \left(\frac{m}{d^3} \right) d^{0,2} \left(\frac{V_0}{1000} \right)^{1,33} \quad (3.5)$$

Onde x é a distância penetrada pelo míssil, f_c é a resistência a compressão do concreto em MPa, V_0 é a velocidade de ataque do míssil (definida como a velocidade com que o míssil colide com o alvo), d é o diâmetro equivalente explicado, na Seção 4.2, e m é a massa.

Posteriormente, em 1943, baseados na fórmula do BRL e em dados estudados nos dois anos anteriores pelo *Ordnance Department of the US Army* (18), o *Army Corp of Engineering*, por meio de extrapolação de dados experimentais, construiu a fórmula (no Sistema Inglês):

$$\frac{x}{d} = \frac{282,6}{\sqrt{f_c}} \left(\frac{m}{d^3} \right) d^{0,215} \left(\frac{V_0}{1000} \right)^{1,5} + d \quad (3.6)$$

cujos limites de aplicação são:

$$1 \text{ in } (25,4 \text{ mm}) \leq d \leq 16 \text{ in } (406,4 \text{ mm})$$

$$0,4 \text{ lb } (0,18 \text{ kg}) \leq M \leq 2500 \text{ lb } (1133,98 \text{ kg})$$

$$1500 \text{ psi } (10,34 \text{ MPa}) \leq f_c \leq 8000 \text{ psi } (55,16 \text{ MPa})$$

$$500 \frac{\text{ft}}{\text{sec}} \left(152,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \leq V_0 \leq 3000 \text{ ft/sec } \left(914,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

Em 1946, o *National Defense Committee* propôs uma fórmula para um projétil não deformável penetrando em um alvo de concreto, oferecendo uma boa aproximação dos resultados experimentais encontrados. A primeira fórmula definida foi (no Sistema Inglês):

$$G\left(\frac{x}{d}\right) = KNd^{0,20} \left(\frac{M}{d^3} \right) \left(\frac{V_0}{1000} \right)^{1,8} \quad (3.7)$$

onde:

$$G\left(\frac{x}{d}\right) = \left(\frac{x}{2d}\right)^2, \quad \frac{x}{d} \leq 2 \quad (3.8)$$

ou

$$G\left(\frac{x}{d}\right) = \frac{x}{d} - 1, \quad \frac{x}{d} \geq 2 \quad (3.9)$$

Este modelo adiciona um fator referente ao míssil: o fator de forma do nariz, que proporciona um tratamento particular e mais dependente da forma da parte frontal do míssil, visto que este é um fator vital para a penetração de qualquer objeto em qualquer alvo. Este parâmetro se refere ao formato da área do míssil que colide. Neste caso, é igual a 0,72, valor definido para áreas planas [16]. Além disso, K é o fator de penetrabilidade do concreto.

No entanto, devido à redução no interesse em estudar colisões de mísseis contra alvos de concreto, o estudo foi interrompido antes de uma completa definição do fator K . R.P. Kennedy [19] definiu, experimentalmente, a relação:

$$K = \frac{180}{(f_c)^{1/2}} \quad (3.10)$$

Com isso, foi definida a NDRC Modificada como:

$$x = \frac{2\sqrt{180}N^{1/2}}{f_c^{1/4}} d^{-0,4} m^{1/2} \left(\frac{V_0}{1000}\right)^{0,9} \quad (3.11)$$

quando $0 \leq \frac{x}{d} \leq 2$

$$x = \frac{180}{f_c^{1/2}} N d^{-1,8} m \left(\frac{V_0}{1000}\right)^{1,8} + d \quad (3.12)$$

quando $\frac{x}{d} > 2$.

4. Resultados

Originalmente, as espessuras das barreiras são apresentadas no Sistema Internacional e os modelos, no Sistema Inglês, vide Tabela 4. No entanto, para que se tivesse equivalência entre ambos, foi necessário converter as unidades das variáveis. Os resultados finais, calculados em Excel [20], foram convertidos para o Sistema Internacional.

Tabela 4: Dados de entrada nos sistemas Inglês e Internacional.

Dados	Variavel	SI		Inglês	
		Valor	unidade	Valor	unidade
Diâmetro Equivalente	d	0,209	m	8,248	in
Massa	M	80	kg	176,370	lb
Comprimento	L1	1,214	m	47,795	in
Resistência Concreto	f_c	40	Mpa	5801,520	psi
Área	A	0,034	m ²	53,427	in ²
Fator de Forma do Nariz	N	0,72		0,72	

A Tabela 5 apresenta as espessuras de cada barreira, bem como seus materiais.

Tabela 5: Espessuras das barreiras de aço e concreto [4].

Nº	Descrição	Material	SI		Sistema Inglês	
			Espessura	Unidade	Espessura	Unidade
1	Carcaça da turbina	Aço Carbono	58	mm	2,6488	in
2	Parede do prédio da turbina	Concreto Armado	250	mm	11,4171	in
3	Parede do contêiner marítimo	Aço Carbono	3	mm	0,1370	in
4	Parede Externa do TTRL	Aço inoxidável	10	mm	0,4567	in
5	Parede do meio do TTRL	Aço inoxidável	15	mm	0,6850	in
6	Parede interna do TTRL	Aço Carbono	30	mm	1,3701	in

A Tabela 6 indica as velocidades com que o míssil colide com cada barreira. O modelo alternativo para este trabalho propõe que seja realizada a junção de dois modelos: BRL para aço com NDRC Modificado para concreto. Para o cálculo da velocidade de saída, foi determinado o diferencial entre a velocidade de entrada do míssil na barreira e aquela correspondente à velocidade limite necessária para que o míssil atinja o final da barreira.

Tabela 6: Velocidades de entrada do míssil em cada parede, calculadas por cada modelo.

Velocidades de Impacto	Unidade	1	2	3	4	5	6
Velocidade do Míssil ETN)	m/s	322,7	117,7	NA	NA	NA	NA
Velocidade BRL (Aço)	m/s	322,7	141,9	NA	NA	NA	NA
Velocidade NDRC (Concreto)	m/s	NA	141,9	NA	NA	NA	NA

O modelo BRL para aço, constante na segunda linha da Tabela 6, mostra que o míssil transpassou a primeira barreira e atingiu a segunda com velocidade de 141,9 m/s. Na linha 3, NDRC Modificado, mostra que a barreira de concreto foi atingida com a mesma velocidade de 141,9 m/s, que não foi suficiente para que o míssil atingisse a barreira 3.

A Tabela 7 mostra a profundidade que o míssil conseguiu atingir em cada barreira. A primeira linha indica a espessura de todas as barreiras. A partir da segunda linha, estão as distâncias em cada modelo, como o caso da Eletronuclear S/A, onde o míssil parou na barreira de concreto após percorrer 168,4 mm dos 250 mm totais. No entanto, considerando os modelos propostos, o NDRC indica que o míssil parou ao percorrer 204,1 mm dos 250 mm totais.

Em ambas as tabelas, a expressão “NA” indica que o míssil não atingiu tal barreira.

Tabela 7: Espessuras penetradas em cada parede, calculadas por cada modelo.

Espessuras	Unidade	1	2	3	4	5	6
Espessura da Barreira	mm	58	250	3	10	15	30
Espessura (ETN)	mm	58	168,4	NA	NA	NA	NA
Espessura NDRC (Concreto)	mm	NA	190,1	NA	NA	NA	NA

O gráfico da Figura 15 mostra o comportamento dos modelos utilizados para colisão contra barreira de aço para diferentes velocidades. Como os estudos das fórmulas propostas pela Eletronuclear S/A e pelo *Ballistic Research Laboratory* não apresentam limites para as variáveis utilizadas nos cálculos, optou-se por verificar a diferença percentual em módulo das penetrações calculadas, para cada velocidade, entre ambos os modelos, escolhendo as diferenças inferiores a 10% em módulo. Foi verificado, então, que os vértices entre 75 m/s e 363 m/s, ambos inclusive, possuem diferença entre os dois modelos de até 10%, sendo que a diferença no vértice onde ocorre a colisão, 322,7 m/s, a diferença foi de 5,56%. Pegando este intervalo, a diferença média foi de 5,59%.

Ainda pode-se notar no resultado apresentado na Tabela 6 que, por permitir que o míssil saia com velocidade superior ao modelo utilizado pela Eletronuclear, o modelo BRL apresenta caráter mais conservador, ou seja, é o pior cenário entre os dois.

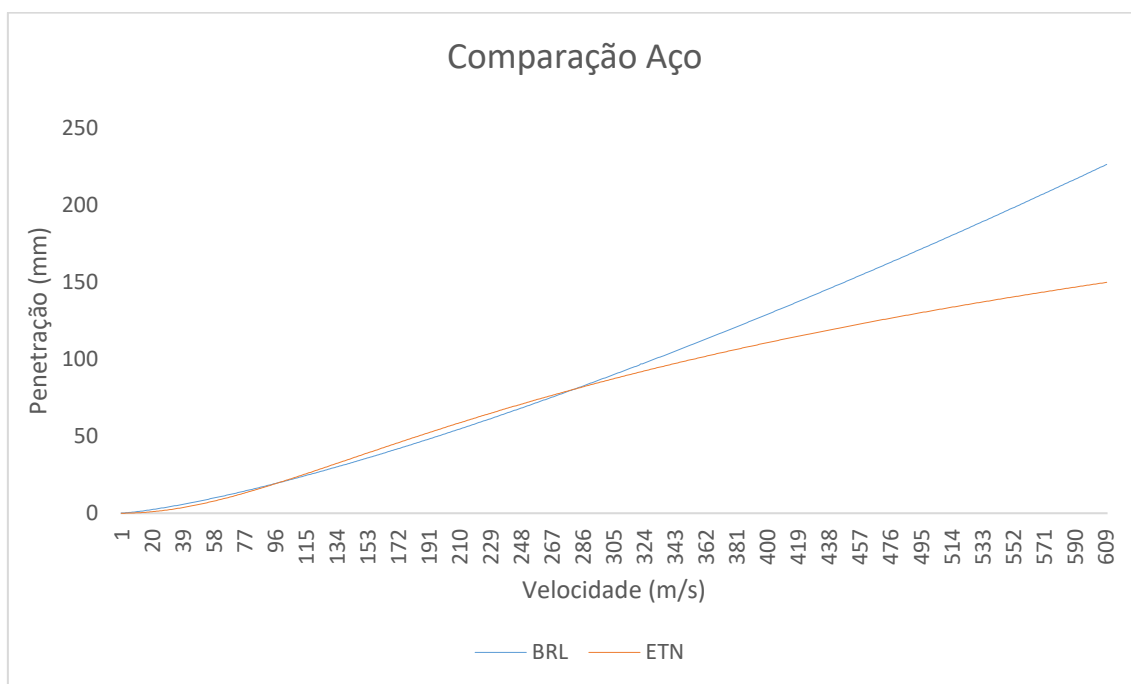


Figura 15: Comparação das espessuras penetradas pelo míssil por velocidade, calculadas pelos modelos utilizados pela Eletronuclear S/A e BRL.

Na comparação para concreto, o gráfico da Figura 15 mostra o comportamento entre os modelos utilizados para colisão contra barreira de concreto para diferentes velocidades. Como os estudos das fórmulas propostas pela Eletronuclear S/A e pelo *National Defense Research Committee* Modificada não apresentam limites para as variáveis utilizadas nos cálculos, optou-se por verificar a diferença percentual em módulo das penetrações calculadas, para cada velocidade, entre ambos os modelos, escolhendo os diferenciais não maiores do que 10% em módulo. Foi verificado, então, que os vértices entre 97 m/s e 119 m/s, ambos inclusive, possuem diferença entre os dois modelos de até 10%, sendo que a diferença no vértice onde ocorre a colisão, 141,9 m/s, a diferença foi de 21,85%. Pegando este intervalo, a diferença média foi de 5,04%.

Ainda pode-se notar que no resultado apresentado na Tabela 6 que, por permitir que o míssil saia com velocidade superior ao modelo vigente, o modelo ETN apresenta caráter mais conservador, ou seja, é o pior cenário entre os dois para a maior parte do domínio de velocidade. No entanto, para a velocidade de interesse, 141,9 m/s, o NDRC apresenta-se mais conservador.

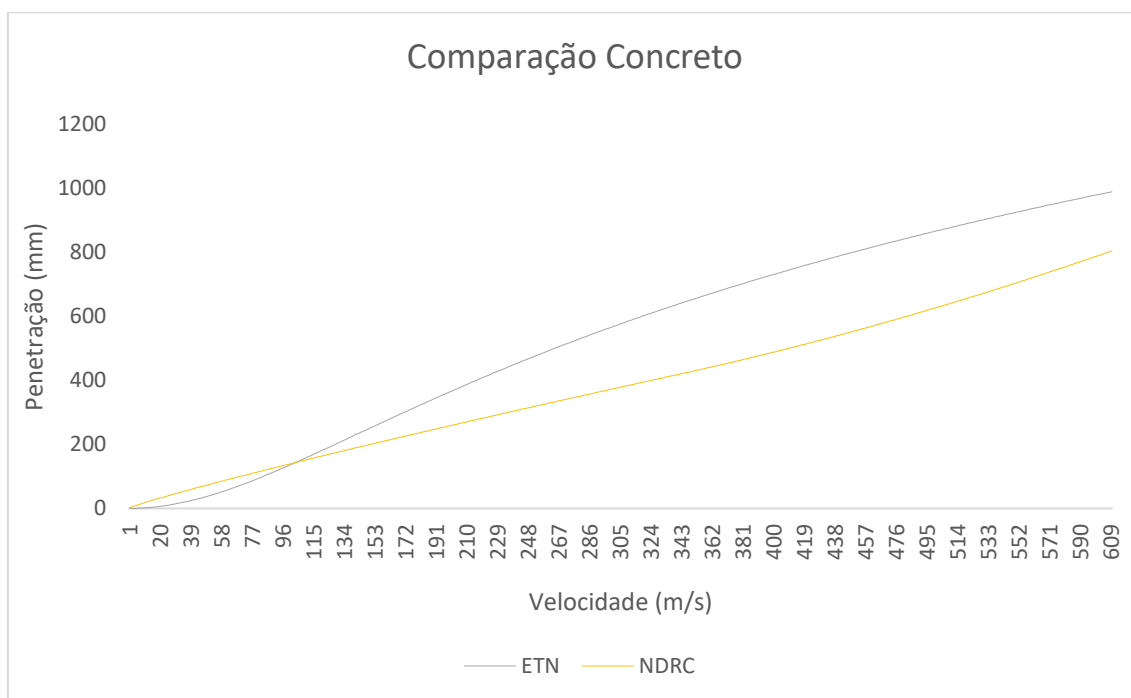


Figura 16: Comparação das espessuras penetradas pelo míssil por velocidade, calculadas pelos modelos utilizados pela Eletronuclear S/A e NDRC.

A literatura ainda apresenta clara carência de mais estudos práticos para validação das fórmulas conhecidas. Em sua maioria, as fórmulas para penetração em concreto, lidam com velocidades acima de 1000 ft/s (304 m/s). A Calspan Corporation [21] realizou testes de impacto, em 1975, para obter essas respostas e comparou com diversos modelos de penetração, incluindo o NDRC. Basicamente, estes testes trabalharam com intervalos de:

- resistência à compressão: 4400 a 5800 psi (30 e 40 Mpa);
- velocidade: 120 a 550 ft/s (36,58 a 152,4 m/s);
- espessura da parede: 12 a 24 in (304,8 a 605,6 mm);

Os resultados mostraram que as espessuras previstas pelo modelo NDRC Modificado foram entre 5% e 20% superiores, com média de 13%, enquanto os outros modelos demonstraram discrepâncias maiores, chegando a ser superior a 100%. Aplicando esta previsão ao resultado encontrado, o intervalo de penetração pode estar entre 158,42 e 181,05 mm, ainda dentro dos 250 mm da parede de concreto.

O NDRC Modificado possibilita trabalhar com diferentes resistências à compressão. O gráfico da Figura 17 permite visualizar a diferença de penetração entre concretos de 40 MPa, escolhido por ser a resistência à compressão mais encontrada quando se refere a concreto comum e 30,33 MPa, por ser o valor equivalente ao mínimo de 4400 psi

encontrado pela Calspan Corporation. Nesta mudança de resistência, o gráfico mostra o comportamento esperado, de permitir maior penetração para uma mesma velocidade. No caso específico da velocidade de colisão de 141,9 m/s, a penetração mudou de 190,14 mm para 204,32 mm, aumento de 7,46%. Outro ponto que pode ser levado em conta é determinar qual velocidade pode ser o limite para que o míssil atinja mais de 250 mm e, portanto, ultrapasse a parede. Enquanto que no concreto de 40 MPa a velocidade máxima era de aproximadamente 192 m/s (para uma distância de 249,62 mm e, portanto, não perfura), ao diminuir a resistência para 30,33 MPa, a velocidade máxima passa a ser aproximadamente 178 m/s (distância de 249,86 mm), uma queda de 7,29%.

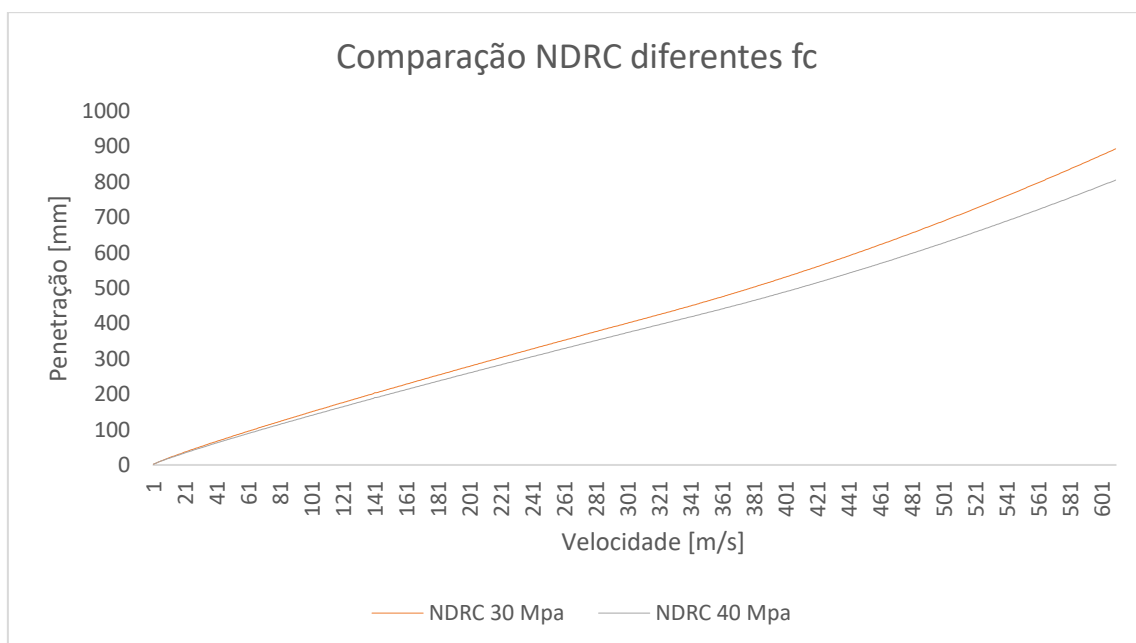


Figura 17: Compara o do comportamento do gráfico quando se diminui a resistência do concreto de 40 Mpa para 30,33 Mpa.

5. Conclusão

Antes de começar a busca pelos resultados que são alvos deste estudo, é importante entender o problema e realizar as considerações e simplificações iniciais. Primeiro, foi explicado o contexto operacional, que consiste na Transferência de Rejeitos Radioativos Líquidos de Angra 1 e Angra 2. Foram abordados os meios, como o Tanque de Transferência de Rejeito Líquido (TTRL) e o veículo que transportaria tal tanque, além das possíveis rotas previstas, sendo as Rotas 1 e 3 as que estão localizadas próximas ao prédio da Turbina de Angra 2.

Definidos os caminhos possíveis, foi preciso postular a ocorrência do acidente (desprendimento da palheta) da turbina de Angra 2 e entender seu funcionamento. Foi definido que o míssil seria a palheta inteira, considerado como corpo rígido e que seu movimento seria composto, exclusivamente, por translação e rotação em torno do seu centro de gravidade, com velocidade de rotação igual à do eixo da turbina em condições normais de operação. Para cálculos e considerações acerca da área de ataque, foi definido o único cenário de colisão da área superior da palheta com os alvos. Por fim, foram expostos os fundamentos físicos e matemáticos que norteiam o movimento da palheta

De uma forma geral, foi possível notar que, no cenário macroscópico de comparação entre o modelo utilizado pela Eletronuclear S/A e os modelos compostos trabalhados neste estudo, o resultado foi semelhante, com o míssil parando na segunda barreira com uma margem de segurança relevante em ambos os casos.

No cenário microscópico, analisando os modelos em si, o BRL demonstrou maior grau de conservadorismo na quase totalidade do domínio apresentado no gráfico da Figura 15 além do fato de ser recomendado pela *National Regulatory Commission*, dos Estados Unidos. Na análise da colisão contra a parede de concreto, o modelo utilizado pela Eletronuclear S/A apresentou resultado conservador para a maior parte do domínio. No entanto, a literatura internacional endossa o NDRC como o melhor modelo disponível para previsão de penetração de míssil em parede de concreto por apresentar resultados encontrados via fórmula bastante condizentes com os testes realizados ao longo dos anos. Este modelo se mostrou bastante versátil por se basear em teorias de penetração, permitindo que seja extrapolado para além dos limites estabelecidos via comprovação experimental.

Além da credibilidade que o modelo NDRC mantém desde a sua formulação, cabe destacar que este modelo permite que se especifique, por meio da resistência à

compressão, o concreto que está sendo trabalhado, situação que não é possível pelo modelo vigente. Ao diminuir a resistência para um valor que ainda é considerado para construções comuns, a velocidade limite caiu 7,29%. Cabe ressaltar que, dependendo da real velocidade de saída do míssil da parede de aço, por meio de medição experimental, esta diferença poderá variar e tornar-se fator decisivo para manter a palheta dentro do prédio da turbina.

O modelo vigente mostra redução para 36,47% do valor da velocidade inicial após transpassar a primeira barreira de aço, indo de 322,7 m/s para 117,7 m/s. Já o BRL apresenta redução para 43,97% do valor inicial, para 141,9 m/s. Independente do modelo utilizado, os 58 mm de barreira de aço foram suficientes para reduzir a velocidade do míssil para menos da metade da velocidade inicial.

Visto que tanto o desprendimento da palheta, quanto o seu encontro com o Contêiner-Tanque são considerados improváveis, este episódio é igualmente declarado como de frequência improvável. No entanto, mesmo sua ocorrência sendo considerada quase inexistente, suas consequências causam grande impacto, fazendo com que sua severidade seja considerada crítica.

Referências

1. **International Atomic Energy Agency.** Nuclear Power Reactors. [Online] <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-reactors>. Acesso em 20/01/2019
2. **Eletrobrás, Eletronuclear.** [Online] <http://www.eletronuclear.gov.br/Aempresa/CentralNuclear.aspx>. Acesso em 01/02/2019
3. **TULACZ, J. and SMITH, R.E.** Assessment of missiles generated by pressure component failure and its application. *Nucl. Energy*. 19, 1980, Vol. 151.
4. **MONTE, L.** *CNAAA – Rejeitos Radioativos – Transferência de Rejeitos Radioativos Líquidos, por Contêiner-Tanque, de Angra 1 para Processamento e Acondicionamento*. Rio de Janeiro : Relatório Técnico ETN, No GSR.T / 2 / BP / 05008, 2006.
5. **AG, KWU – Kraftwerk Union.** *Steam Turbine Description, Technical Data: Construction*,. Plant KKW/Angra 2. s.l. : Serial Number 117225.
6. **Nussenzveig, H. M.** *Curso de Física básica/H. Moysés Nussenzveig*. 4ª. São Paulo : Edgard Blücher, 2002.
7. **Apostol, T. M.** *Cálculo*. Rio de Janeiro: Editora Reverté, 1979
8. **Beer, F. P. e Johnston, E. R.** *Mecânica Vetorial para Engenheiros – Dinâmica, Vol. II*. [trad.] Clóvis Sperb de Barcelos e colaboradores. São Paulo : Editora Mc Graw – Hill do Brasil LTDA, 1976.
9. **Mannan, Sam.** *Lees' Loss Prevention in the Process Industries Hazard Identification, Assessment and Control*. Texas A&M University, College Station, : Connor Process Safety Center, Department of Chemical Engineering, 2004.
10. **C.R, Russel.** *Reactor Safeguards*, Pergamon Press, Oxford, 1972.
11. *Effects of impact and explosion, Summary Technical*. National Defense Research Committee. Washington, D.C., Vol 1, 1946
12. **AK, Kar.** *Local effects of tornado generated missiles*. ASCE J Struct Div 1978. 104(ST5):809–16.
13. **Li Q.M. , Chen X.W.** Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile. *International Journal of Impact Engineering*. Março 2002.
14. **Bechtel Power Corporation.** BC-TOP-9 Rev.2, Design of Structures for Missile Impact. September 1974, Revision 2. San Francisco, California
15. **U.S Nuclear Regulatory Commission.** *Protection Against Turbine Missiles*. Regulatory Guide (RG) 1.115., Washington D.C., January 2012.

16. **Kennedy, R.P.** A review of procedures for the analysis and design of concrete structures. *Holmes & Narver Inc.* December de 1975.
17. **Gwaltney R.C.** *Missile generation and protection in light water-cooled reactor power plants.* ORNL NSIC-22, Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, TN : s.n., 1968.
18. *Fundamentals of protective structures.* Office of the Chief of Engineers, Army Corps of Engineers. s.l. : Report AT120 AT1207821, 1946.
19. **Kennedy, R.P.** Effects of an aircraft crash into a concrete reactor containment building. July de 1966, Holmes & Narver Inc.
20. **Vassallo, F.A.** *Missile input testing of reinforced concrete panels.* HC-5609-D-1, Calspan Corporation. Buffalo, New York : s.n., Jan. (1975).